

제주 가파도 해역의 조하대 해조상 및 군집구조의 연간 변동

김보연 · 한송헌 · 이승종 · 고준철*

국립수산과학원 아열대수산연구소

Annual Variation of Macroalgal Flora and Community Structure in the Subtidal Zone at Gapado Island, Jeju, Korea

Bo Yeon Kim, Song-Hun Han, Seung-Jong Lee and Jun-Cheol Ko*

Subtropical Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Jeju 63068, Republic of Korea

We seasonally examined marine macroalgal community structures in the subtidal zones at Gapado Island, Jeju, Korea, from February 2013 to November 2019. A total of 164 macroalgal species were identified, including 15 green, 40 brown, and 109 red algae. Species richness ranged from 54–106 species, with the maximum observed in 2013 and the minimum observed in 2015. *Cladophora wrightiana* var. *minor*, *Ecklonia cava*, *Amphiroa anceps*, *Corallina aberrans*, *Corallina crassissima*, *Synarthrophyton chejuense*, *Sonderophycus capensis* and *Plocamium telfairiae* occurred in all seasons. The average annual seaweed biomass was 1,258.22 g wet wt./m², ranging from 917.51 g/m² in 2017 to 1,551.95 g/m² in 2014. *E. cava* was the most dominant species, accounting for 46.57% of the total seaweed biomass. The subdominant species were *P. telfairiae* and *A. anceps*, comprising 8.64% (108.75 g/m²) and 6.65% (83.61 g/m²) of the total biomass, respectively. The vertical distribution of subtidal seaweeds were represented by *E. cava* and *P. telfairiae* at 5–20 m, *A. anceps* at 10–20 m, *C. aberrans* and *C. crassissima* at 5 m and *C. wrightiana* var. *minor* at 10 m. Cluster analysis revealed three distinct groups: group A (2014–2018), group B (2019) and group C (2013), indicating significant differences in the annual seaweed community.

Keywords: Macroalgae, Community structure, Biomass, Gapado, Jeju

서론

해양생태계의 주요 일차생산자인 해조류는 다양한 해양생물의 산란장과 서식지를 제공하는 등 생태적으로 중요한 역할을 하고 있다(Satheesh and Wesley, 2012; Liang et al., 2014). 또한, 식용, 산업용, 의약품의 원료로도 이용되어 산업적 활용도가 높으며(Tierney et al., 2010; Koch et al., 2013), 최근에는 해조류의 이산화탄소격리 집약도(CO₂ sequestration intensity)와 탄소 격리량(total carbon sequestration)이 연안 탄소 생태계와 비교할 때 훨씬 높은 것으로 나타나 블루카본 흡수원으로서의 가능성이 점차 높아지고 있다(Krause-Jensen et al., 2018; Raven, 2018; Chen and Xu, 2020). 해조류는 다양한 환경 요인에 의해 영향을 받으며, 계절이나 서식처의 환경에 따라 다른 군집구조를 보인다고 알려져 있다(Wells et al., 2007; Wagdy et

al., 2015). 예로, 수온이 상승하게 되면 엽상해조류가 감소하고 산호조류가 증가하게 된다(Fujita, 2010; Hwang et al., 2017; Kim et al., 2023). 또한, 인간 활동에 의한 환경스트레스가 적은 안정된 해역에서는 다년생 해조류가 우점하고, 환경스트레스가 증가하게 되면 수관부 형성(canopy-forming) 켈프종에서 덩불형성(turf-forming) 해조류, 일년생 기회종(*Ulva* spp., *Cladophora* spp. 등)이 우점하는 군집구조로 변화한다(Wells et al., 2007; Kraufvelin et al., 2010; Whitaker et al., 2010). 이처럼 해조류 군집은 인간의 활동에 의한 교란 등 환경변화에 민감하게 반응하는 특성이 있어 해조류 군집을 모니터링하여 연안 생태계 변화를 확인할 수 있다(Tribollet and Vroom, 2007; Chakraborty et al., 2014; Vale et al., 2021). 제주도 연안의 해조상 연구는 Kang (1960)에 의해 최초로 보고되었고, 이후 많은 연구자들이 조간대 및 조하대 해조군집에 대한 연구를 수행

*Corresponding author: Tel: +82. 64. 750. 4375 Fax: +82. 64. 743. 5883

E-mail address: kjc3410@korea.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2024.0079>

Korean J Fish Aquat Sci 57(1), 79-87, February 2024

Received 8 January 2024; Revised 26 January 2024; Accepted 6 February 2024

저자 직위: 김보연(인턴연구원), 한송헌(해양수산연구소), 이승종(해양수산연구소), 고준철(해양수산연구소)

하였다(Lee and Lee, 1976, Yoo, 2003; Oak et al., 2004; Kim et al., 2013, 2018, 2023; Kang et al., 2015; Cho et al., 2022). 뿐만 아니라 제주 연안에 비해 상대적으로 환경이 안정되어 높은 생물다양성을 보이는 우도나 마라도와 같은 제주도 부속도서에 서식하는 해조류에 대해서도 많은 연구가 이루어졌다(Kim et al., 2008; Ko et al., 2008; Kang et al., 2011; Kang and Kim, 2012). 가파도는 제주도 부속도서 중 4번째 큰 섬으로 2009년부터 청보리축제가 개최되었고, 2010년에는 올레길 10-1코스가 개장되어 입도객수가 계속 증가하고 있어(Kang, 2015) 인간 활동에 의한 해양오염으로 인한 해조군집의 변화가 예상되나 가파도 연안의 해조상 연구는 본 연구자가 수행한 모니터링(Kim et al., 2018)외에는 현재까지 보고된 바가 없다.

해조 군집 연구는 향후 해양환경의 변화에 따른 연안 생태계의 변화를 예측하기 위한 기초 자료를 확보하기 위해 수행되며(Kim et al., 2013; Jung et al., 2019; Cho et al., 2022), 이를 위해서는 동일 정점에서 장기간 연구를 수행하여 변화 양상을 밝히는 것이 중요하다. 따라서, 본 연구는 가파도 연안의 조하대에 서식하는 해조류의 종조성 및 군집구조의 변화를 파악하기 위해 장기 모니터링을 수행하였으며, 향후 해조 자원의 보존 및 관리방안 등을 확립하기 위한 근거 자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

본 연구를 수행하기 위한 해조류의 채집은 제주도 남부에 위치한 가파도 해역의 조하대 5 m (33°09.855'N, 126°16.455'E), 10 m (33°09.746'N, 126°16.736'E), 20 m (33°09.746'N, 126°17.172'E) 수심에서 2013년 2월부터 2019년 11월까지 7년간 계절별로 SCUBA Diving에 의해 실시되었다(Fig. 1). 표층과 저층의 수온 및 염분은 Niskin 채수기로 채수한 후, YSI (6600-V2; YSI Incorporated, Yellow Springs, OH, USA)를 사용하여 현장에서 측정하였다.

해조상 조사를 위해 조하대 수심별로 10×10 cm로 구획된 50×50 cm 방형구 3개를 무작위로 놓고 방형구 내에 출현하는 모든 해조류를 끌갈을 사용하여 채집하였으며, 채집된 해조류는 10% 포르말린(해수) 용액으로 고정 후 실험실로 운반하였다. 정량 측정을 위해 담수로 수회 세척한 후 전자저울(CB-300; AND, Seoul, Korea)을 사용하여 중별 습중량을 0.01 g 단위로 측정하였으며, 단위 면적당 생물량(g wet wt./m²)으로 환산하였다. 출현종의 동정 및 분류체계는 Lee and Kang (2002), Lee (2008), Choi et al. (2016)과 AlgaeBase (<http://www.algaebase.org>; Guiry and Guiry, 2024)를 참고하였다.

가파도 해역의 연도별 출현종과 생물량 자료를 사용하여 풍도지수(richness index, R), 균등도지수(evenness index, J), Shannon's 다양도지수(diversity index, H') 및 우점도지수(dominance index, DI)를 계산하였다(Shannon and Weaver, 1949; Margalef, 1958; McNaughton, 1967; Fowler and Cohen, 1990). 또한, 연평균 생물량으로 해역별 유사도(similar-

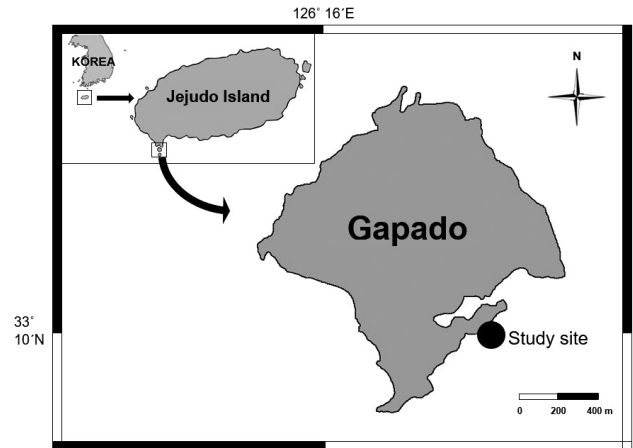


Fig. 1. A map of sampling site in Gapado Island, Jeju, Korea, from 2013 to 2019.

ity)를 분석하고(Bray and Curtis, 1957), 그룹 간 유의차는 SIMPROF (similarity profile) tests를 실시하여 검정하였으며, K-dominance curve를 분석하여 연도별 우점도를 비교하였다(Lambhead et al., 1983). 군집분석은 PRIMER version 6을 사용하였다(Clarke and Gorley, 2006).

결 과

수온과 염분

연구기간 동안 가파도 해역의 평균 수온은 $18.9 \pm 0.76^\circ\text{C}$ (mean \pm SE)였으며, 2014년에 18.2°C 로 가장 낮았고, 2016년과 2019년에 19.5°C 로 가장 높았다(Fig. 2a). 동계 수온은 2017년까지 증가하는 경향을 보이다가 2018년에 13.1°C 로 감소하였고, 하계 수온의 경우 2013년, 2016년, 2019년에 25°C 이상의 높은 수온을 보였다.

연구기간 동안의 평균 염분은 33.9 ± 0.28 (mean \pm SE)였으며, 2015년과 2016년에 33.6으로 최소, 2018년에 34.5로 최대였다(Fig. 2b). 특히, 2016년 하계에는 염분이 29.4로 가장 낮은 값을 보였으며, 2014년과 2018년을 제외한 모든 기간에 여름철 저염분수의 영향을 받은 것으로 보인다.

종조성

연구기간 동안 가파도 해역에서는 녹조류 15종(9.15%), 갈조류 40종(24.39%), 홍조류 109종(66.46%)으로 총 164종의 해조류가 출현하였으며, 홍조류의 출현 비율이 가장 높았다(Table 1). 연도별 출현종수를 보면 연간 54–106종으로 2015년에 최소, 2013년에 최대로 나타났으며, 분류군별 출현 비율은 녹조류가 5.56–8.22%, 갈조류가 23.58–30.67%, 홍조류가 61.33–69.81%로 연도별로 유사하였다. 모든 계절에 출현한 종은 갈색대마디말(*Cladophora wrightiana* var. *minor*), 감태

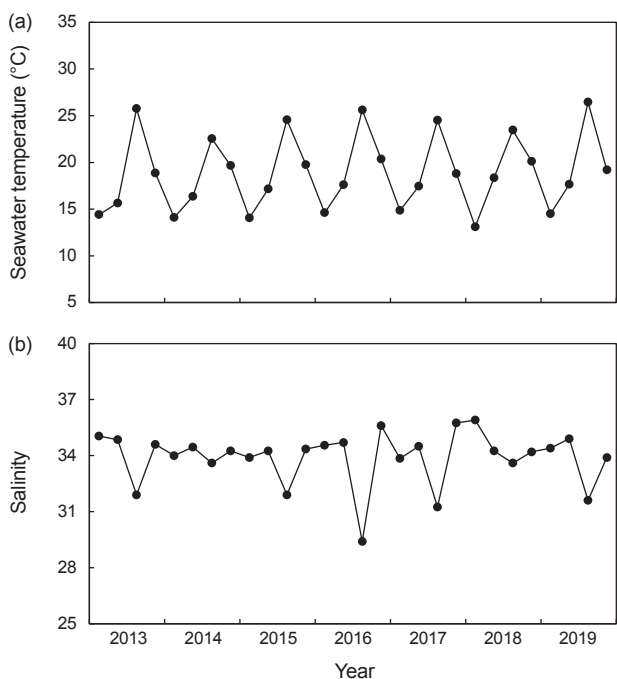


Fig. 2. Variations of seawater temperature and salinity at Gapado Island, Jeju, Korea, from 2013 to 2019.

(*Ecklonia cava*), 넓은게발(*Amphiroa anceps*), 방황혹산호말(*Corallina aberrans*), 둘레혹산호말(*Corallina crassisima*), 낭과찍(*Synarthrophyton chejuense*), 아프리카바다표고(*Sonderophycus capensis*), 참곱슬이(*Plocamium telfairiae*)로 녹조류 1종, 갈조류 1종, 홍조류 6종으로 총 8종이었다. 이외에도 큰열매모자반(*Sargassum macrocarpum*), 에페드라게발(*Amphiroa ephedraea*), 눈썹마디게발(*Amphiroa foliacea*), 긴가지산호말(*Ellisolandia elongata*), 붉은뼈까막살(*Grateloupia angusta*)이 총 28회 조사 중 25회 이상 출현하여 높은 출현 빈도를 보였다.

생물량

연구기간 동안 가파도 해역의 해조류 평균 생물량은 $1,258.22 \pm 89.55$ g wet wt./m² (mean \pm SE)였다. 연간 생물량은 917.51–1,551.95 g/m²로 2014년에 최대 생물량을 보인 후 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3). 분류군별 평균 생물량은 녹조

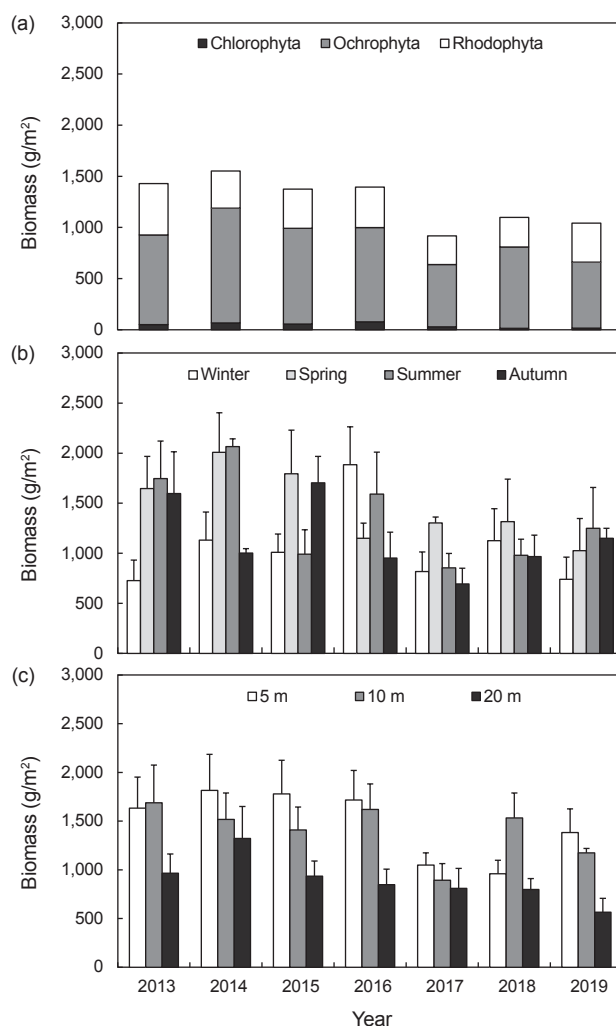


Fig. 3. Annual (a), seasonal (b) and vertical (c) variations in average seaweed biomass (g wet wt./m²) at Gapado Island, Jeju, Korea, from 2013 to 2019. Vertical bars represent standard errors.

류 44.16 g/m² (3.51%), 갈조류 843.32 g/m² (67.03%), 홍조류 370.73 g/m² (29.46%)로 갈조류의 생물량이 최대였다. 녹조류와 홍조류의 연도별 생물량은 큰 차이가 없으나 갈조류의 경우 608.36–1,122.98 g/m²로 2014년에 최대였다가 점차 감소하여 전체 생물량의 변화 양상과 유사하였으며, 그 중 감태류(*Ecklonia* spp.)와 모자반류(*Sargassum* spp.)의 생물량이 90% 이상을 차지하였다(Fig. 3a). 계절별 생물량은 1,062.53–1,463.71 g/m²로 동계에 최소, 춘계에 최대였으며, 2015–2016년을 제외하고 춘계와 하계에 생물량이 높고, 추계와 동계에 생물량이 낮게 나타나는 유사한 계절 변화를 보였다(Fig. 3b). 수심별 평균 생물량은 5 m에서 1,476.89 g/m², 10 m에서 1,405.63 g/m², 20 m에서 892.13 g/m²로 5 m와 10 m에서 생물량이 높게 나타났다(Fig. 3c).

Table 1. Annual variations in the number of macroalgal species occurred at Gapado Island, Jeju, Korea, from 2013 to 2019

| | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | Total |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Chlorophyta | 7 | 6 | 3 | 5 | 6 | 5 | 6 | 15 |
| Ochrophyta | 25 | 18 | 14 | 18 | 23 | 20 | 22 | 40 |
| Rhodophyta | 74 | 49 | 37 | 43 | 46 | 48 | 51 | 109 |
| Total | 106 | 73 | 54 | 66 | 75 | 73 | 79 | 164 |

우점종 및 수직분포

연구기간 동안 가파도 해역의 평균 생물량이 가장 높은 종은 감태(585.92 g/m², 46.57%)였으며, 그 다음은 참곱슬이(108.75 g/m², 8.64%), 넓은게발(83.61 g/m², 6.65%), 큰열매 모자반(80.09 g/m², 6.37%), 방황흑산호말(73.05 g/m², 5.81%)의 순으로 나타났다. 또한, 수심 5 m에서는 감태와 참곱슬이, 10 m에서는 감태, 20 m에서는 감태와 넓은게발이 전체 생물량의 10% 이상을 차지하는 우점종으로 확인되었다. 연도별 우점종을 보면, 2013년과 2014년에는 감태와 참곱슬이가 우점하였고, 2015년부터 수심 10 m와 20 m에서 넓은게발의 비율이 높게 나타났다(Table 2). 수심 5 m에서는 2017년에 산호말류

(*Corallina* spp.)가 우점하기 시작하였고, 2018년부터는 큰열매 모자반이 최우점종이었다. 감태는 연구기간 동안 전 수심에서 우점하는 종이었으며, 참곱슬이는 2013년에는 전 수심에서 높은 생물량을 보이며 우점했던 종이었으나 2019년에 생물량이 감소하였다.

유사도분석

출현종의 생물량을 이용하여 연도별 유사도 분석 결과, 통계학적으로 유의차를 보이는 3개의 그룹, 즉 그룹 A (2014-2018년), 그룹 B (2019년), 그룹 C (2013년)로 구분되었다(Fig. 4). 그룹 A와 B의 유사도는 71.34%였으며(SIMPROF test, P<0.05), 그룹 C는 다른 그룹과 69.32% (SIMPROF test, P<0.05)로 가장

Table 2. Vertical distribution of dominant macroalgae (>10%) based on mean biomass (g wet wt./m²) at Gapado Island, Jeju, Korea, from 2013 to 2019

| Period | 5 m | 10 m | 20 m |
|--------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 2013 | <i>Ecklonia cava</i> | <i>Ecklonia cava</i> | <i>Ecklonia cava</i> |
| | <i>Plocamium telfairiae</i> | <i>Plocamium telfairiae</i> | <i>Plocamium telfairiae</i> |
| 2014 | <i>Ecklonia cava</i> | <i>Ecklonia cava</i> | <i>Ecklonia cava</i> |
| | <i>Plocamium telfairiae</i> | | |
| 2015 | <i>Ecklonia cava</i> | <i>Ecklonia cava</i> | <i>Ecklonia cava</i> |
| | <i>Sargassum horneri</i> | <i>Amphiroa anceps</i> | <i>Amphiroa anceps</i> |
| | | <i>Plocamium telfairiae</i> | <i>Sargassum macrocarpum</i> |
| 2016 | <i>Ecklonia cava</i> | <i>Ecklonia cava</i> | <i>Ecklonia cava</i> |
| | <i>Sargassum macrocarpum</i> | <i>Amphiroa anceps</i> | <i>Amphiroa anceps</i> |
| | <i>Plocamium telfairiae</i> | <i>Cladophora wrightiana</i> | <i>Sargassum serratifolium</i> |
| 2017 | <i>Ecklonia cava</i> | <i>Ecklonia cava</i> | <i>Ecklonia cava</i> |
| | <i>Corallina aberrans</i> | <i>Amphiroa anceps</i> | <i>Amphiroa anceps</i> |
| | | <i>Plocamium telfairiae</i> | <i>Sargassum serratifolium</i> |
| 2018 | <i>Sargassum macrocarpum</i> | <i>Ecklonia cava</i> | <i>Ecklonia cava</i> |
| | <i>Ecklonia cava</i> | | <i>Amphiroa anceps</i> |
| | <i>Corallina aberrans</i> | | <i>Sargassum yendoii</i> |
| | <i>Plocamium telfairiae</i> | | |
| 2019 | <i>Sargassum macrocarpum</i> | <i>Ecklonia cava</i> | <i>Ecklonia cava</i> |
| | <i>Corallina crassisima</i> | | <i>Sargassum serratifolium</i> |
| | <i>Ecklonia cava</i> | | <i>Amphiroa anceps</i> |
| | <i>Corallina aberrans</i> | | |

Table 3. Various community indices of macroalgae for mean biomass (g wet wt./m²) at Gapado Island, Jeju, Korea, from 2013 to 2019

| | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|----------------------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Dominance index (DI) | 0.58 | 0.67 | 0.58 | 0.58 | 0.47 | 0.62 | 0.47 |
| Richness index (R) | 14.45 | 9.80 | 7.34 | 8.98 | 10.85 | 10.28 | 11.23 |
| Evenness index (J') | 0.50 | 0.41 | 0.48 | 0.48 | 0.56 | 0.44 | 0.53 |
| Diversity index (H') | 2.34 | 1.74 | 1.90 | 2.01 | 2.41 | 1.90 | 2.32 |

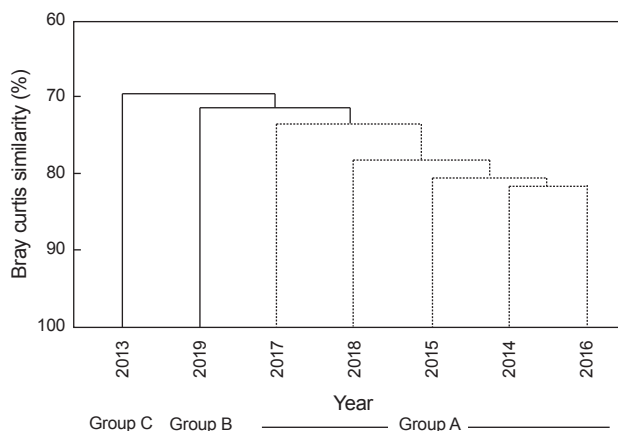


Fig. 4. Results of cluster analysis performed on Bray Curtis similarity from standardized species biomass transformed data. The dotted lined indicate no significant difference among seven years (SIMPROF test).

낮은 유사도를 보여 해조 군집이 연도별 차이가 있음을 확인하였다. 3개 그룹 간의 비유사성(dissimilarity)에 기여하는 종을 알아보기 위해 실시한 SIMPER 분석 결과, 그룹 A와 B 사이에서는 2019년에 생물량이 감소한 감태와 엔도모자반(*Sargassum yendoi*), 반대로 생물량이 증가한 들레혹산호말의 기여도가 높게 나타났으며, 그룹 C와는 2013년 이후 생물량이 감소한 참곱슬이의 기여도가 높게 확인되었다.

군집지수

전체 생물량에 대한 제 1, 2 우점종의 생물량 합의 비로 산출된 DI는 0.47-0.67의 범위로 나타났으며, 2019년에 감태와 큰 열매모자반이 46.56%를 차지하며 최소였고, 2014년에는 감태와 참곱슬이의 생물량이 66.57%를 차지하며 최대로 나타났다 (Table 3). R은 7.34-14.45의 범위로 2015년에 최소, 2013년에 최대였으며, J'와 H'는 각각 0.41-0.56, 1.74-2.41로 2014년에 최소, 2017년에 최대를 보였다.

연도별로 출현한 종의 연평균 생물량을 K-dominance 곡선으로 비교하면, 전체 생물량의 약 70% 정도를 차지하는 우점종이 2014년에는 감태, 참곱슬이, 방황혹산호말로 3종이었으며, 2015-2016년, 2018년에는 4종, 2013년, 2019년에는 5종이었다 (Fig. 5). 2017년에는 감태, 넓은게발, 톱니모자반 (*Sargassum serratifolium*), 방황혹산호말, 참곱슬이, 미역 (*Undaria pinnatifida*) 6종의 생물량이 전체 생물량의 70% 이상을 차지하여 종 다양성이 가장 높게 나타났다.

고찰

가파도 해역에서 출현한 해조류는 총 164종(녹조류 15종, 갈조류 40종, 홍조류 109종)이며, 연도별로는 2013년에 106종으

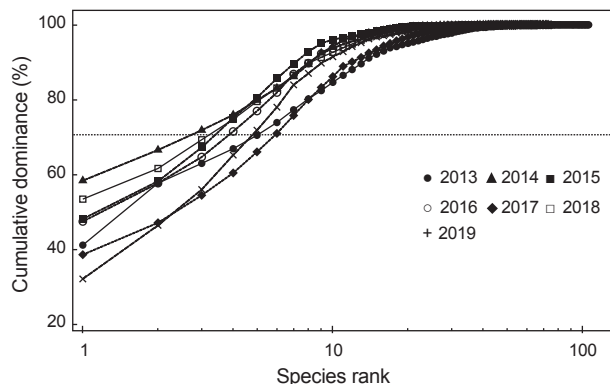


Fig. 5. K-dominance curves (x-axis logged) for mean biomass at at Gapado Island, Jeju, Korea, from 2013 to 2019.

로 최대였고, 2015년에 54종으로 가장 적었다가 점차 증가하는 경향을 보였다 (Table 1). 이는 우도의 262종 (Kang et al., 2011)에 비해 낮았으나 마라도(144종; Kang and Kim, 2012), 지귀도(70종; Kang et al., 2015), 형제섬(60종; Jung et al., 2019), 문섬(46종; Ko et al., 2008)보다 높은 출현종수를 보였다 (Table 4). 또한, 제주 남부 4개 해역에서 87종 (Kang et al., 2015), 신흥해역에서 68종 (Kim et al., 2016), 제주 남·동부 8개 해역에서 121종 (Jung et al., 2019), 제주 6개 해역에서 101종 (Cho et al., 2022), 제주 동·서·남·북 4개 해역에서 147종 (Kim et al., 2023)이 출현하여 가파도 해역이 다른 제주도 연안 및 부속도서에 비해 상대적으로 많은 종이 출현하는 것으로 확인되었다. 출현종의 분류군 중 갈조류의 구성비를 보면, 본 연구에서는 24.39%였으며, 다른 부속도서 해역에서는 23.28-29.79%로 유사한 값을 보였다 (Kang et al., 2011; Kang and Kim, 2012; Jung et al., 2019; Cho et al., 2022). 반면, 제주 연안에서는 4.76-19.30%의 범위로 갈조류의 구성비가 다소 낮았는데 (Kim et al., 2013, 2016, 2018, 2023; Jung et al., 2019) 이는 모자반류 (*Sargassum* spp.), 뼈대그물말류 (*Dictyopteris* spp.), 가시그물바탕말류 (*Spatoglossum* spp.) 등의 출현율 차이 때문인 것으로 보인다.

해조류의 생물량은 해조 군집의 특성을 나타내는 척도 중 하나로 군집구조를 정량적으로 파악하기 위해서는 생물량의 비교, 분석이 필요하다 (Phillips et al., 1997; Graham and Wilcox, 2000; Choi et al., 2006; Han et al., 2018). 연구기간 동안 출현한 해조류의 평균 생물량은 1,258.22 g wet wt./m²였으며, 2014년에 1,551.95 g/m²로 최대를 보인 후 점차 감소하였다. 가파도 해역은 우도(2,934.5 g/m²; Kang et al., 2011), 마라도(2,932.3 g/m²; Kang and Kim, 2012), 지귀도(3,222.5 g/m²; Kang et al., 2015), 형제섬(3,965.6 g/m²; Jung et al., 2019) 등 다른 제주 주변 도서 해역에 비해 해조류 생물량이 낮게 확인되었는데 (Table 4), 이는 마라도, 형제섬, 지귀도의 경우 최우점종과 준우점종이 감태, 모자반류 같은 대형 갈조류였으며, 이들의 생물량이 전체 생물량의 76.8-89.4%를 차지하며 우점한

반면, 가파도 해역에서는 우점종으로 확인된 감태와 큰열매모자반의 생물량 비율이 52.93%로 다소 낮아 대형 갈조류의 생물량 차이에 기인한 것으로 보인다. 반면, 가파도 해역의 해조류 생물량이 제주 본섬 주변 해역에 서식하는 해조류의 생물량인 448.85–1,186.0 g/m² (Kim et al., 2016, 2023; Jung et al., 2019) 보다 높게 나타나 상대적으로 인간 활동으로 인한 교란이 적은 도서 해역의 해조류 생물량이 높다고 보고한 이전의 연구 결과와 유사하였다(Kang et al., 2015; Kim et al., 2018). 해조군집에 대한 연구는 조사 시기(횡수), 수심 및 조사 방법에 차이가 있으며, 모든 연구가 동일하게 이루어지는 것은 아니기 때

문에 직접적인 비교는 어려우나 가파도 해역의 종 다양성은 제주 연안에 비해 높은 것으로 생각된다. 하지만, 가파도의 한해 관광객 입도객수가 2014년에 11만명에서 2022년에 43만명으로 증가하여(Kang, 2015; JTO, 2023) 이로 인한 해양오염, 환경변화 등 해조 군집의 변화가 예상되어 효율적인 해조 자원의 관리를 위한 지속적인 연구가 요구된다.

제주 연안의 조하대 해조류 군집은 감태와 모자반류가 해중립을 이루고, 유절산호조류가 높은 생물량을 보이며 우점하고 있다고 알려져 있다(Kang et al., 2015; Kim et al., 2018, 2023). 본 연구에서도 감태의 생물량이 585.92 g/m²로 전체 생물량

Table 4. Comparisons of the number of species, mean biomass and dominant species among this and previous studies

| Study site | Shore level | Number of species | Biomass (g/m ²) | Dominant species (subtidal) | References |
|--------------|-------------|-------------------|-----------------------------|--|---------------------|
| Gapado | Sub | 164 | 1,258.2 | <i>Ecklonia cava</i> <i>Plocamium telfairiae</i> <i>Amphiroa anceps</i> <i>Sargassum macrocarpum</i> <i>Corallina aberrans</i> | This study |
| | Sub | 66 | 3,960.2 | - | Cho et al. (2022) |
| Udo | Inter/Sub | 262 | 2,934.5 | <i>Ecklonia cava</i> <i>Undaria pinnatifida</i> <i>Plocamium telfairiae</i> <i>Sargassum horneri</i> <i>Sargassum macrocarpum</i> <i>Dictyopteris prolifera</i> | Kang et al. (2011) |
| | Inter/Sub | 144 | 2,932.3 | <i>Ecklonia cava</i> <i>Sargassum macrocarpum</i> <i>Sargassum horneri</i> <i>Sargassum coreanum</i> <i>Cladophora wrightiana</i> var. <i>minor</i> | Kang and Kim (2012) |
| Marado | Sub | 47 | 2,571.7 | <i>Sargassum macrocarpum</i> <i>Ecklonia cava</i> <i>Amphiroa anceps</i> <i>Cladophora wrightiana</i> var. <i>minor</i> | Jung et al. (2019) |
| | Sub | 70 | 3,222.5 | <i>Ecklonia cava</i> <i>Undaria pinnatifida</i> <i>Sargassum serratifolium</i> | Kang et al. (2015) |
| Hyeongjeseom | Sub | 60 | 3,965.6 | <i>Sargassum macrocarpum</i> <i>Ecklonia cava</i> <i>Dictyopteris undulata</i> | Jung et al. (2019) |
| Munseom | Sub | 46 | 2,784.0 | <i>Ecklonia cava</i> Articulate coralline algae <i>Chondrus ocellatus</i> <i>Sargassum</i> spp. | Ko et al. (2008) |

의 46.57%를 차지하여 출현종 중 가장 높은 생물량을 보이며 우점하였고, 넓은계발과 방황혹산호말 등 산호조류의 생물량 또한 높게 나타나 제주 연안의 해조상 연구 결과와 유사하였다. 연도별 우점종을 보면, 감태와 참곱슬이는 매년 전체 생물량의 5% 이상을 차지하였고, 방황혹산호말은 2015년을 제외한 전 기간에, 넓은계발과 큰열매모자반은 2015년 이후부터 우점하여 출현하였다. 이러한 주요종들의 생물량 변화를 보면, 감태류(*Ecklonia* spp.)의 경우 2014년에 907.89 g/m²로 전체 생물량의 58.50%를 차지하여 최대였고, 2017년에 354.66 g/m² (38.65%)로 급격히 감소하였으며, 2019년에 366.35 g/m² (35.18%)로 나타나 생물량은 50% 이상, 전체 생물량에 대한 비율은 20% 이상 감소한 것으로 나타났다. 참곱슬이류(*Plocamium* spp.) 또한 2013년에 237.42 g/m² (16.61%)로 최대를 보인 후 2016–2019년에는 94.59–54.15 g/m² (5.57–6.97%)로 60% 이상 감소한 것으로 나타났다. 반면, 넓은계발, 방황혹산호말과 같은 유절산호조류는 2013년에 231.34 g/m² (16.18%)였으나 2017년에는 205.58 g/m² (22.41%), 2019년에는 286.39 g/m² (27.50%)로 생물량 비율이 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 제주 연안의 해조상 연구에서 수온 상승으로 인해 무성했던 감태 군락이 감소하고 그 자리를 유절산호조류가 차지하는 군집 변화 양상과 유사하였다(Hwang et al., 2017; Cho et al., 2022; Kim et al., 2023). 해조류의 군집구조는 환경스트레스가 증가하게 되면 다년생 해조류가 감소하고, 수온이 상승하면 유·무절산호조류의 피도가 증가하는 등 환경변화에 따라 변한다고 알려져 있다(Fujita, 2010; Kraufvelin et al., 2010; Whitaker et al., 2010). 본 연구에서도 이와 같은 해조 군집의 변화가 관찰되어 환경변화가 가파도 해조상에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 하지만, 환경 변화의 원인을 파악하기에는 다소 무리가 있으며, 제주 연안에 비해 높은 종 다양성을 보이는 가파도 해조 자원의 보존과 관리를 위해 해조군집과 해양환경과의 상호관계를 명확히 파악하고, 좀 더 세밀하고 심도 있는 연구 및 분석이 필요하다.

결론적으로 본 연구기간 동안 가파도 해역에서 출현한 해조류는 총 163종이고, 연평균 생물량은 1,258.22 g wet wt./m²였으며, 출현종수는 2013년에, 생물량은 2014년에 최대를 보였다. 전체 생물량의 46.57%를 차지한 감태가 최우점종이었으며, 그 다음으로는 참곱슬이, 넓은계발, 큰열매모자반, 방황혹산호말 순이었다. 가파도 해역의 해조상 모니터링은 Kim et al. (2018)이 수행하였으나 이 자료가 본 연구에 포함되어 가파도 해역에서 식하는 조하대 해조류의 군집 변화를 파악한 것은 본 연구가 유일하다 할 수 있다. 본 연구는 제주 부속도서 중 유인도이며, 최근 입도객이 증가하고 있는 가파도 해역을 대상으로 하여 동일 해역에서 7개년의 장기간 동안 해조상 및 해조군집을 모니터링하였으며, 향후 환경오염, 기후변화 등 여러 요인에 의한 해조군집 변화 연구의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 국립수산물과학원 아열대수산연구소「제주주변 연근해 어업 및 환경생태조사, R2024012」과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Bray JR and Curtis JT. 1957. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecol Monogr* 27, 325-349. <https://doi.org/10.2307/1942268>.
- Chakraborty S, Bhattacharya T, Singh G and Maity JP. 2014. Benthic macroalgae as biological indicators of heavy metal pollution in the marine environments: Abiomonitring approach for pollution assessment. *Ecotoxicol Environ Saf* 100, 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.12.003>.
- Chen Y and Xu C. 2020. Exploring new blue carbon plants for sustainable ecosystems. *Trends Plant Sci* 25, 1067-1070. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.07.016>.
- Cho SH, Noh YS, Won SH, Kim SK and Jung SM. 2022. Ecological evaluation using seaweed distribution characteristics along the coast of Jeju Island. *Korean J Environ Ecol* 36, 627-638. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2022.36.6.627>.
- Choi CG, Kwak SN and Sohn CH. 2006. Community structure of subtidal marine algae at Uljin on the east coast of Korea. *Algae* 21, 463-470. <https://doi.org/10.4490/AL-GAE.2006.21.4.463>.
- Choi HG, Kim YS, Kim CS, Park JW and Nam KW. 2016. A Photographic Guide to Marine Botany in Hallyeohaesang National Park. Hallyeohaesang National Park Office, Sacheon, Korea, 1-288.
- Clarke KR and Gorley RN. 2006. PRIMER V6: User Manual/tutorial. PRIMER-E Ltd., Plymouth, U.K., 1-190.
- Fowler J and Cohen L. 1990. *Practical Statistics for Field Biology*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, U.S.A., 1-227.
- Fujita D. 2010. Current status and problems of iosityake in Japan. *Bull Fish Res Agen* 32, 33-42.
- Graham LE and Wilcox LW. 2000. *Algae*. Prentice-Hall, London, U.K., 1-700.
- Guiry MD and Guiry GM. 2024. AlgaeBase. National University of Ireland, Galway, Ireland. Retrieved from <http://www.algaebase.org> on Jul 4, 2024.
- Han SJ, Hwang YH, Son MH, Choi HG and Jang JG. 2018. Seasonal variation in seaweed community structure in the subtidal zone of the southern part of the East coast of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 51, 571-578. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0571>.
- Hwang SI, Kim DK, Sung BJ, Jun SK, Bae JI and Jeon BH. 2017. Effects of climate change on whitening event proliferation the coast of Jeju. *Korean J Environ Ecol* 31, 529-536. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2017.31.6.529>.
- JTO (Jeju Tourism Organization). 2023. Report of the Jeju Tour-

- ism Market Trends. Jeju Tourism Organization Report, JTO, Jeju, Korea, 1-36.
- Jung SW, Jeon BH and Choi CG. 2019. Characteristics of summer marine algal community and barren ground in the southern coast of Jeju, Korea. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 25, 212-219. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2019.25.2.212>.
- Kang GS, Ko YD and Kim YS. 2015. Flora and community structure of subtidal zone in South Jeju, Korea. *J Fish Mar Sci Edu* 27, 273-283. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2015.27.1.273>.
- Kang JC, Choi HG and Kim MS. 2011. Macroalgal species composition and seasonal variation in biomass on Udo, Jeju Island, Korea. *Algae* 26, 333-342. <https://doi.org/10.4490/algae.2011.26.4.333>.
- Kang JC and Kim MS. 2012. Seasonal variation in depth-stratified macroalgal assemblage patterns on Marado, Jeju Island, Korea. *Algae* 27, 269-281. <https://doi.org/10.4490/algae.2012.27.4.269>.
- Kang JW. 1960. The summer algal flora of Cheju Island (Quelpart Island). *Bull Pusan Fish Coll* 3, 17-23.
- Kang YS. 2015. The environmental impact of naturalized plants inhabited to Islet near Jeju-do. Ph.D. Thesis, University of Jeju, Jeju, Korea.
- Kim BY, Han SH, Kim JN and Ko JC. 2023. Monitoring of marine algal flora and community structure in subtidal zone around Jeju coasts, Korea (2016-2018). *Korean J Fish Aquat Sci* 56, 691-700. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0691>.
- Kim BY, Ko JC and Choi HG. 2016. Rock type difference and benthic community structures in the coast of Jeju, Korea. *Korean J Environ Ecol* 30, 996-1008. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2016.30.6.996>.
- Kim BY, Ko JC and Choi HG. 2018. Monitoring of macroalgal flora and community structure in the subtidal zone around Jeju Coasts and Gapado Island, Korea (2013-2015). *Korean J Fish Aquat Sci* 51, 262-277. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0262>.
- Kim BY, Ko JC, Ko HJ, Park SE, Cha HK and Choi HG. 2013. Seasonal variation in community structure of subtidal seaweeds in Jeju Island, Korea. *Kor J Fish Aquat Sci* 46, 607-618. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0607>.
- Kim MS, Kim M, Chung MH, Kim JH and Chung IK. 2008. Species composition and biomass of intertidal seaweeds in Chuja Island. *Algae* 23, 301-310. <https://doi.org/10.4490/algae.2008.23.4.301>.
- Koch M, Bowes G, Ross C and Zhang XH. 2013. Climate change and ocean acidification effects on seagrasses and marine macroalgae. *Global Change Biol* 19, 103-132. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02791.x>.
- Ko YW, Sung GH, Yi CH, Kim HH, Choi DM, Ko YD, Lee WJ, Koh HB, Oak JH, Chung IK and Kim JH. 2008. Temporal variations of seaweed biomass in Korean coasts: Munseom, Jeju Island. *Algae* 23, 295-300. <https://doi.org/10.4490/algae.2008.23.4.295>.
- Kraufvelin P, Lindholm A, Pedersen MF, Kirkerud LA and Bondorff E. 2010. Biomass, diversity and production of rocky shore macroalgae at two nutrient enrichment and wave action levels. *Marine Biol* 157, 29-47. <https://doi.org/10.1007/s00227-009-1293-z>.
- Krause-Jensen D, Lavery P, Serrano O, Marbà N, Masque P and Duarte CM. 2018. Sequestration of macroalgal carbon: The elephant in the blue carbon room. *Biol Lett* 14, 20180236. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0236>.
- Lambshhead PJD, Platt HM and Shaw KM. 1983. The detection of differences among assemblages of marine benthic species based on an assessment of dominance and diversity. *J Nat Hist* 17, 859-874. <https://doi.org/10.1080/00222938300770671>.
- Lee YP. 2008. Marine Algae of Jeju. Academy Books Inc., Seoul, Korea, 1-477.
- Lee YP and Kang SY. 2002. A Catalogue of the Seaweeds in Korea. Cheju National University Press, Cheju, Korea, 1-662.
- Lee YP and Lee IK. 1976. On the algal community in the intertidal belt of Jeju Island. 1. Algal community of spring season. *Korean J Bot* 19, 111-118.
- Liang Z, Wang F, Sun X, Wang W and Liu F. 2014. Reproductive biology of *Sargassum thunbergii* (Fucales, Phaeophyceae). *Am J Plant Sci* 5, 2574-2581. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.517271>.
- Margalef R. 1958. Information theory in ecology. *Gen Syst* 3, 36-71.
- McNaughton SJ. 1967. Relationship among functional properties of California Grassland. *Nature* 216, 168-169. <https://doi.org/10.1038/216168b0>.
- Oak JH, Keum YS, Hwang MS and Oh YS. 2004. Subtidal algal community of Supseom and Seongsanpo in Jeju Island. *Underwater Sci Tech* 5, 3-9.
- Phillips JC, Kendrick GA and Lavery PS. 1997. A test of a functional group approach to detecting shift in macroalgal communities along a disturbance gradient. *Mar Ecol Prog Ser* 153, 125-138. <https://doi.org/10.3354/meps153125>.
- Raven J. 2018. Blue carbon: Past, present and future, with emphasis on macroalgae. *Biol Lett* 14, 20180336. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0336>.
- Satheesh S and Wesley SG. 2012. Diversity and distribution of seaweeds in the Kudankulam coastal waters, South-Eastern coast of India. *Biodiversity J* 3, 79-84.
- Shannon CE and Weaver W. 1949. The Mathematical Theory of Information. University of Illinois Press, IL, U.S.A.
- Tierney MS, Croft AK and Hayes M. 2010. A review of antihypertensive and antioxidant activities in macroalgae. *Bot Mar* 53, 387-408. <https://doi.org/10.1515/bot.2010.044>.
- Tribollet AD and Vroom PS. 2007. Temporal and spatial comparison of the relative abundance of macroalgae across the Mariana Archipelago between 2003 and 2005. *Phycologia* 46, 187-197. <https://doi.org/10.2216/06-46.1>.

- Vale CG, Arenas F, Barreiro R and Piñeiro-Corbeira C. 2021. Understanding the local drivers of beta-diversity patterns under climate change: The case of seaweed communities in Galicia, North West of the Iberian Peninsula. *Divers Distrib* 27, 1696-1705. <https://doi.org/10.1111/ddi.13361>.
- Wagdy L, Atef M, Laila A, Shima M and Shima H. 2015. Ecological studies of macroalgae in Alexandria Mediterranean waters. *Egypt J Exp Biol* 11, 169-180.
- Wells E, Wilkison M, Wood P and Scanlan C. 2007. The use of macroalgal species richness and composition on intertidal rocky seashores in the assessment of ecological quality under the European water framework directive. *Mar Pollut Bull* 55, 151-161. <https://doi.org/10.1016/j.marpollbul.2006.08.031>.
- Whitaker SG, Smith JR and Murray SN. 2010. Reestablishment of the southern California rocky intertidal brown alga, *Silvetia compressa*: An experimental investigation of techniques and abiotic and biotic factors that affect restoration success. *Restor Ecol* 18, 18-26. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00717.x>.
- Yoo JS. 2003. Community dynamics of benthic marine algae in the intertidal and subtidal rocky shore of Samyang, Jeju Island. *Algae* 18, 301-309. <https://doi.org/10.4490/algae.2003.18.4.301>.